

## 明 細 書

## 点回折干渉計、反射鏡の製造方法及び投影露光装置

## 発明の背景

## 1. 発明の利用分野

本発明は、高精度な面精度測定に用いられる点回折干渉計、反射ミラーの製造方法及び投影露光装置に関する。

## 2. 従来技術の記載

近年、半導体集積回路素子の微細化に伴い、光の回折限界によって制限される光学系の解像度を向上させるために、X線を使用した露光方式（リソグラフィ技術）が開発されている。

X線リソグラフィ装置の光学系としての反射光学系は、非球面のものを含む複数の反射ミラーから構成される。

X線リソグラフィに用いられる光学系の総合波面収差は $\lambda/14\text{rms}$ 以下でなければならない、そのため各ミラーの面精度（加工精度）には $0.2\text{nmrms}$ という極めて高い精度が要求される。このような高精度で加工するためには、反射ミラーの形状計測には更に高精度、例えば、 $0.1\text{nmrms}$ 程度の測定精度が必要とされる。

一般に、超精密計測の手段として点回折干渉計（Point Diffraction Interferometer、以下、PDIという）が用いられる。点回折干渉計には、大別してピンホールにより発散球面波を生じさせるものと、ファイバーにより発散球面波を生じさせるものがある。

図6は、従来のピンホールにより発散球面を生じさせるPDI（以下、ピンホール方式という）の原理を示す図である。1は集光レンズ、2はピンホールミラー、3は被検ミラー、4はCCDである。ピンホールミラー2は、金属板にピンホールを形成したものの他に、透明基板と、その基板上に形成されたクロム等の金属膜とから構成されたものが用いられる。

不図示の光源から照射された光は、集光レンズ1によってピンホール2 a 上に

集光され、その一部はピンホールミラー 2 に形成されたピンホール 2 a を透過する際に回折し、発散球面波となって空間に拡散する。

この発散球面波の一部 (W 1) は、参照波面として用いられる。

他の一部 (W 2) は、測定波面として用いられ、被検ミラー 3 に向けて照射され、被検面 3 a で反射される (W 2') とともにピンホールミラー 2 に向けて集光される。

集光された測定波面 (W 2') はピンホールミラー 2 で再び反射され (W 2'')、参照波面 (W 1) と干渉し、CCD 4 上に干渉縞を形成する。被検面 4 の不図示のホルダーにはピエゾ素子が備えられており、被検物を微小に振動させて干渉縞の変化を CCD で検出してこれを解析することにより、面精度が算出される。

図 7 は、従来のファイバーにより発散球面波を生じさせる PDI (以下、ファイバー方式) の原理を示す図である。5 は、出射面に反射増加膜が形成されたシングルモードファイバーである。

不図示の光源から出射された光は、集光レンズ 1 を介してシングルモードファイバー 5 に照射される。このファイバー 5 から射出した光束は、理想的な球面波となる。従って、シングルモードファイバーを前述したピンホールミラーの代わりにファイバー方式の点回折干渉計に適用すると、ピンホール方式と同様の原理により、被検面の面形状を測定することができる。

しかし、上記従来の PDI では、種々の要因により誤差が生じ、十分な測定精度が得られなかった。誤差が生じる要因としては、主に以下に示すものがあげられる。

#### (1) 集光レンズの残収差による場合

前述したようにピンホール方式の PDI においては、レーザー光をピンホールミラー 2 に形成されたピンホール 2 a に集光するために集光レンズ 1 が用いられる。

この集光レンズ 1 は複数枚のレンズから構成され、一般に収差を持っている。そのため、一般にピンホール 2 a 上における集光スポットは収差により歪んでしまう。従って、ピンホール径が大きすぎると、ピンホール 2 a 透過後の波面が歪んだままとなり、理想的な球面波にはならない。その結果、高精度の測定をすることができない。

## (2) 偏光光に起因する場合

ピンホール方式のPDI、ファイバー方式のPDIのいずれにおいても、光源にはレーザー光が用いられ、一般に偏光した光（直線偏光光）が被検物3に照射される。

直線偏光光を用いた場合、以下に示すように、反射波面の位相変化という問題が生じる。これは、反射波面の歪みを意味し、その結果、高精度の測定を行うことができない。

図6に示すピンホール方式のPDIを例に用いると、被検面で反射された波面(W2')は角度をもってピンホールミラー2に戻り、ピンホールミラー2で再び反射される。このとき、反射波の位相が被検面からの反射波のピンホール2aへの入射角によって異なるために、反射波面(W2'')が歪んでしまう。被検物の面形状測定は、参照波面W1とW2''との干渉によって計測されるので、歪んだ反射波面(W2'')による、高精度の測定は不可能である。すなわち、被検物を0.2nmの面精度で測定することは不可能である。

## (3) 反射位相差の制御

被検面3aからの反射波面(W2')が、ピンホールミラー2に形成されたピンホール2a近傍に集光される際に散乱され、その結果波面が乱れてしまう。

図9は、所定の反射位相差が生じるピンホールミラーに形成されたピンホール径に対する反射波面の拡大率（反射波面の乱れ）を示す図である。ここで、反射波面の拡大率とは、ピンホールミラー2に形成されたピンホール2aにて、被検面3aからの反射波面が散乱され、拡大する程度を指す。

即ち、反射波面の拡大率が1の場合は、被検面3aからの形状情報である波面(W2')が忠実に反射波面(W2'')に反映されていることを意味する。また、拡大率が1より大きい場合は、被検面3aからの形状情報である波面(W2')が、忠実に反射波面(W2'')に反映されておらず、ピンホールミラー2における反射によって波面が乱れていることを意味する。例えば、反射波面の拡大率が2の場合、ピンホールミラー2における反射後の反射波面(W2'')の歪みが、被検面3aにおける反射波面(W2')の歪みの2倍であることを意味する。

また、反射位相差とは、ピンホール内部（基板）とピンホール外部（反射膜）との反射位相の差をいう。

図9では、波長 $\lambda = 633\text{ nm}$ 、被検面の開口数NAが0.2、反射膜が膜厚200 nmのクロム膜である場合を想定して計算を行った。

図9から、例えば、ピンホール径 $1.5\text{ }\mu\text{ m}$ の場合、ピンホールにおける散乱により、波面形状が2倍にまで拡大し、高精度な計測はできないことがわかる。

本発明は、従来のこのような問題に鑑みてなされたものであり、大NAの被検物の面精度を高精度に測定可能（約0.2 nm rms程度の面精度が測定可能）な点回折干渉計を提供することを目的とする。また、反射ミラーの製造方法及びこの製造方法により製造された反射ミラーを備えた投影露光装置を提供することを目的とする。

#### 発明の要約

本発明は、光源から照射された光を集光光学系を介してピンホールミラーに照射し、ピンホールミラーが備えるピンホールから回折した光の一部を測定用光束として被測定面に照射し、この被測定面で反射された測定用光束と、ピンホールから回折した光の他の一部である参照用光束とを互いに干渉させ、この干渉により生じる干渉縞の状態を検知することにより被測定面の面精度を測定する点回折干渉計に関する。

特に、本発明は、上記点回折干渉計において、ピンホールの直径の範囲が、

$$\lambda / 2 \leq \phi \text{ PH} \leq \lambda / \text{NA}$$

$\lambda$ ：光源から照射された光の波長、NA：集光光学系の開口数、 $\phi \text{ PH}$ ：ピンホール径

であることを特徴としている。

ピンホール径を所定の範囲内とすることにより、ピンホールミラーに照射された光の波面が収差により歪んでいた場合であっても、ピンホール透過後は、理想的な球面波とすることができ、その結果、高精度の形状測定が可能となる。

また、本発明は、上記点回折干渉計において、集光光学系の開口数の範囲が、

$$\text{NA} \leq \lambda / \phi \text{ PH}$$

$$0 < \text{NA} < 1$$

$\lambda$ ：光源から照射された光の波長、NA：集光光学系の開口数、 $\phi \text{ PH}$ ：ピンホ

ール径

であることを特徴としている。

また、本発明は、上記点回折干渉計において、ピンホールに照射される光が、楕円偏光であり、

$$0.5 < \varepsilon < 2$$

$\varepsilon$  : 楕円偏光の楕円率 (長軸と短軸との比率)

であることを特徴としている。

ピンホールミラーに照射される光として所定の範囲内の楕円偏光を用いることにより、ピンホールミラーにおける反射波面の位相変化量の角度依存性を小さくすることができ、その結果、高精度の形状測定が可能となる。

また、本発明は、上記点回折干渉計において、ピンホールミラーが、透明基板と、この基板上に順次形成された、第一反射膜と、ピンホールを備えた第二反射膜とを有することを特徴としている。

更に、ピンホール径が  $0.5 \mu\text{m}$  以上である場合には、

$$0.5 \leq \gamma < 1$$

$$\phi = \Delta + 360^\circ \times N \quad (-45^\circ \leq \Delta \leq 45^\circ, N = \text{整数})$$

$\gamma$  : 前記ピンホールの内部反射率 (第一反射膜での反射) / 前記ピンホールの外部反射率 (第二反射膜での反射)

$\phi$  : 前記ピンホールの内部反射と外部反射との位相差

であることが望ましい。

上記構成によれば、所定の位相差が生じるピンホールミラーにおいて、反射波面の拡大率 (反射波面の乱れ) を小さくすることができ、その結果、高精度の形状測定が可能となる。

また、本発明は、上記点回折干渉計において、ピンホールミラーの被測定面側に誘電体多層反射膜が形成されていることを特徴としている。

上記構成によれば、被検物からの反射波の位相の入射角度依存性が低下し、高精度の形状測定が可能となる。

また、本発明は、光源から照射された偏光光を偏波保存ファイバーに照射し、このファイバーから射出された偏光光の一部を測定用光束として被測定面に照射

し、この被測定面で反射された測定用光束と、前記ファイバーから射出された偏光光の他の一部である参照用光束とを互いに干渉させ、この干渉により生じる干渉縞の状態を検知することにより被測定面の面精度を測定する点回折干渉計において、光源と偏波保存ファイバーとの間に回転可能な機構を備えた $\lambda/2$ 板を配置したことを特徴としている。

所定の偏光光により被検物を測定して得られる第一データと、 $\lambda/2$ 板を $90^\circ$ 回転させた後に被検物を測定して得られる第二データとを重ね合わせ処理することにより、反射波面の位相変化に起因する誤差が相殺される。その結果、高精度な形状測定が可能となる。

また、本発明は、光源から照射された光をシングルモードファイバーに照射し、このファイバーから射出された光の一部を測定用光束として被測定面に照射し、この被測定面で反射された測定用光束と、前記ファイバーから射出された偏光光の他の一部である参照用光束とを互いに干渉させ、この干渉により生じる干渉縞の状態を検知することにより被測定面の面精度を測定する点回折干渉計であって、シングルモードファイバーの被測定面側の端面に誘電体多層反射膜が形成されていることを特徴としている。

上記構成によれば、被検物からの反射波の位相の入射角度依存性が低下し、高精度の形状測定が可能となる。

また、本発明は、基板上に重元素層と軽元素層とを交互に積層した多層膜が形成された反射ミラーの製造方法において、少なくとも、上述したいずれかの点回折干渉計を用いて面精度を測定する工程を備えていることを特徴としている。

更に、本発明は、軟X線によりマスクを照明する照明光学系と、このマスクに形成されたパターンを感光基板上に投影露光するための投影光学系とを具備する投影露光装置において、照明光学系又は投影光学系が、上述した反射ミラーの製造方法により製造された反射ミラーを備えていることを特徴としている。

#### 図面の簡単な説明

図1は、ピンホール径に対するピンホール透過後の発散球面波の波面収差を示した図である。

図 2 は、本発明の第二実施例のピンホール方式のPDIの概略を示す図である。

図 3 は、本発明の第三実施例のファイバー方式のPDIの概略を示す図である。

図 4 は、本発明の第四実施例のピンホール方式のPDIに適用されるピンホールミラーの概略断面図である。

図 5 は、ピンホール径を  $1 \mu\text{m}$  とした場合におけるピンホール内部反射とピンホール外部反射との反射位相差に対する被検物からの反射波面の拡大率を示す図である。

図 6 は、ピンホールにより発散球面波を生じさせるPDIの原理を示す図である。

図 7 は、ファイバーにより発散球面波を生じさせるPDIの原理を示す図である。

図 8 は、ピンホールミラーへの入射角の  $NA$  に対する反射波面の位相を示したものである。

図 9 は、所定の反射位相差が生じるピンホールミラーにおけるピンホール径と反射波面の拡大率（反射波面の乱れ）との関係を示す図である。

図 10 は、EUVLの一例を示す図である。

#### 好ましい実施様態

以下、本発明に関するPDIの実施例を図面を参照しながら説明する。なお、本発明の実施例のうち、図 6 に示したPDIと基本的に同様の構造を有する部材については、図 6 と同一の符号を付して、その説明を省略する。

図 1 は、ピンホール径 ( $\mu\text{m} \phi$ 、 $\phi$  は直径を示す。) に対するピンホール透過後の発散球面波の波面収差を示した図である。

ここで、透過波面収差は、 $1 \times 10^{-4} \lambda \text{rms}$  を単位として表した。

また、計算は、公知のスカラー回折理論を用いて行った。計算条件は、

- ・ レーザー波長  $\lambda = 633 \text{ nm}$
- ・ 集光レンズ 1 の  $NA$  を 0.4
- ・ ピンホール通過後の発散球面波の  $NA$  を 0.4
- ・ 集光レンズ 1 の収差としてコマ収差  $0.05 \lambda \text{rms}$

とした。なお、波面収差は、発散球面波の  $NA$  を 0.4 として計算した。従って、計測に用いられる  $NA$  は、この  $1/2$  の 0.2 になる。

図1から、ピンホール径が $1.5\mu\text{m}$ より大きくなると急激に収差が増大することがわかる。この条件における集光スポット径（エアリーディスク径）は、 $1.93\mu\text{m}$ であるので、ピンホール径は、集光スポット径（エアリーディスク径） $\times 0.8$ 以下であることが好ましいことがわかる。

即ち、エアリーディスク径 $=\lambda/\text{NA}\times 1.22$

（ $\lambda$ ：レーザー波長、 $\text{NA}$ ：集光レンズの開口数）

であるので、

ピンホール径 $=\lambda/\text{NA}\times 1.22\times 0.8\approx\lambda/\text{NA}$

となる。

一方、ピンホール径がレーザー波長の $1/2$ 以下になると急激に光量が低下することが知られている。光量が不足すると、CCDノイズが大きくなり、被検物の面精度を十分に検出するに足るS/N比が得られず、高精度の測定が不可能となる。

よって、ピンホール径 $\phi\text{PH}$ の好ましい範囲は、

$$\lambda/2 \leq \phi\text{PH} \leq \lambda/\text{NA}$$

となる。即ち、本発明の第一実施例は、ピンホール方式のPDIにおいて、ピンホール径 $\phi\text{PH}$ の範囲を上記範囲に設定したものである。

もっとも、ピンホールミラーを形成する金属板又は金属膜が所定の厚みよりも薄いと、ピンホールに照射される光が十分に遮光されず、光のうち必要な部分だけを透過させることができない、即ち、集光レンズの収差を含んだ光から、その収差部分を除去できないので、理想的な球面波を生じさせることができない。従って、例えば、クロム膜の場合には $100\text{nm}$ 以上、アルミニウム膜の場合には $50\text{nm}$ 以上の膜厚が必要となる。

また、ピンホールは、収差発生観点から、真円であることが好ましい。ピンホールが歪んでいる場合は、その影響により収差が発生するからである。

また、所定のピンホール径を有するピンホールミラーを用いて測定を行う場合は、次の範囲の開口数を有する集光光学系を選択することが好ましい。即ち、集光光学系における望ましい開口数の範囲は、

$$\text{NA} \leq \lambda/\phi\text{PH} \text{ , } 0 < \text{NA} < 1$$



である。

図2は、本発明の第二実施例のピンホール方式のPDIの概略を示す図である。本実施例のピンホール方式のPDIでは、前述した図6に示す従来のピンホール方式のPDIの集光レンズ1の前に直線偏光光を円偏光光にする $\lambda/4$ 板6が配置されている。

図8は、ピンホールミラー2への入射角(NA)に対する反射波面の位相を示している。横軸には、ピンホールミラー2への入射角がNAで表され、縦軸には、ピンホールミラー2における反射波面の位相が表されている。また、計算は、レーザー波長 $\lambda = 633\text{ nm}$ 、反射膜は膜厚 $200\text{ nm}$ のクロム膜を想定して行った。ここで、p偏光は、図6の紙面に平行な偏光であり、s偏光は図6の紙面に垂直な偏光である。他の構成は、図6と同様である。

図8に示された計算結果から、 $NA = 0 \sim 0.4$ の範囲でs偏光、p偏光のいずれもが、約 $0.005\lambda$  歪むことがわかる。また、図8に示すように、s偏光とp偏光とは逆方向に位相がずれている。従って、円偏光光を用いて測定を行えば、s偏光とp偏光の位相のずれは相殺されることが予想できる。

図8に示す計算結果によると、円偏光光を用いた測定をした場合、波面歪は、

$NA = 0 \sim 0.4$ の範囲で $0.0001\lambda\text{ rms}$ 程度

$NA = 0 \sim 0.6$ の範囲で $0.001\lambda\text{ rms}$ 以下

という極めて小さい値にしかない。

その結果、ピンホールミラーに照射される光は、直線偏光に比べて円偏光のほうが、精度が良いということが導かれる。また、円偏光に近い楕円偏光であっても誤差の抑制効果は大きい。また、図8から、楕円率 $0.5 \sim 2$ の楕円偏光であれば、測定誤差を抑制可能であることがわかる。

図3は、本発明の第三実施例のファイバー方式のPDIの概略を示す図である。本実施例のファイバー方式のPDIでは、前述した図7に示す従来のファイバー方式のPDIのシングルモードファイバー5を偏波保存ファイバー7に換え、その前に回転可能な $\lambda/2$ 板8が配置されている。他の構成は、図7の場合と同様である。

このPDIでは、まずp偏光で被検物3を測定して、測定データを取得し(第一

測定データ)、次に $\lambda/2$ 板8を $45^\circ$ 回転してp偏光をs偏光にした上で、s偏光で被検物3を測定して、測定データを取得し(第二測定データ)、双方の測定データを重ね合わせ処理する。その結果、反射波面の位相変化に起因する誤差が相殺される。

なお、測定に用いる偏光は、必ずしもp偏光、s偏光である必要はなく、一方の偏光が他方の偏光に対して偏光面が $90^\circ$ 回転していればよい。

一方、従来のファイバー方式のPDIをシングルモードファイバーを偏波保存ファイバーに置き換えたPDIも、本発明の実施例として適用可能である。このPDIによる被検物3の測定に際しては、まず所定の設置位置で被検物を測定して、測定データを取得し(第一測定データ)、次に被検物を設置位置から $90^\circ$ 回転させて測定して、測定データを取得し(第二測定データ)、双方の測定データを重ね合わせ処理することにより、誤差を相殺する。この場合、双方の測定データを重ね合わせる際には、被検物を $90^\circ$ 回転させたことに応じて、第二測定データを $-90^\circ$ 分回転してから重ねる必要がある。

また、被検物からの反射波の位相の入射角度依存性を小さくするために、前述した図6に示す従来のピンホール方式のPDIのピンホールミラー(金属基板にピンホールが形成されたもの、または透明基板上にピンホールを備えた金属膜が形成されたもの)上にピンホールを備えた誘電体多層膜を形成したPDIも、本発明の実施例として適用可能である。誘電体多層膜は、ピンホール内部の透明基板上に形成してもよい。

更に、従来技術で示した図7に示すファイバー方式のPDIのファイバー反射面(ピンホールを備えた金属膜)上に誘電体多層膜を有するPDIも、本発明の実施例として適用可能である。

一方、通常の偏光光学系(例えば、光磁気再生光学系等)では、反射ミラーに反射位相の偏光依存性があると、偏光が乱れてしまう。そこで、一般には、基板上に誘電体のみからなる多層反射膜を形成した反射ミラーが用いられる。

これを、そのままピンホール方式のPDIに適用し、透明基板上にピンホールを備えた誘電体のみからなる多層反射膜が形成されたピンホールミラーに換えても、ピンホールの機能を果たさない。これは、ピンホールを備えた誘電体のみからな

る反射増加膜では、ピンホール近傍の光が誘電体多層膜の内部に浸透してしまうためである。つまり、金属膜と異なり、誘電体のみの反射増加膜では光を閉じ込めることができず、その結果、ピンホール透過後の波面が理想的な球面波にならず、歪んでしまう。このような理由から、PDIに用いるピンホールミラーには、透明基板上に、ピンホールを備えた金属膜と、ピンホールを備えた誘電体多層膜を順次形成した構成にする必要がある。

本発明の第四実施例のピンホール方式のPDIでは、前述した図6に示す従来のピンホール方式のPDIのピンホールミラー2が、以下に示すピンホールミラーに置き換えられている。他の構成は、図6の場合と同様である。

図4は、第四実施例のピンホール方式のPDIのピンホールミラーの概略断面図である。このピンホールミラーは、ガラス基板9、この基板9上に順次形成された第一反射膜10、ピンホール11aを備えた第二反射膜11とから構成されている。

被検物3の被検面から反射された波面 $W2'$ は、第二反射膜11に形成されたピンホール11aを透過して、第一反射膜10で反射される（以下、ピンホール内部反射という）とともに、第二反射膜11上においても反射される（以下、ピンホール外部反射という）。この場合、ピンホール内部に反射膜（第一反射膜10）を形成することにより、ピンホール内部反射率が向上する。従って、ピンホール内部反射とピンホール外部反射との位相差を $2\pi \times \text{整数}$ とし、ピンホールが実質的に存在しないのと同様の効果を生じさせることにより、ピンホール11aによる散乱が極力抑えられる。

図5は、ピンホール径を $1\mu\text{m}$ とした場合におけるピンホール内部反射とピンホール外部反射との反射位相差に対する被検物からの反射波面の拡大率を示す図である。ここで、 $\gamma = \text{ピンホール内部反射率} / \text{ピンホール外部反射率}$ 、 $\gamma = 0$ は、ピンホール内部反射率が0、即ち完全に透過する場合に相当する。

この場合、望ましい反射位相差の範囲は、

$$\text{反射位相差} = (-45 \sim 45^\circ) + 360^\circ \times \text{整数}$$

$$0.5 \leq \gamma < 1$$

である。

このような条件下では、ピンホールの散乱に起因する反射波面の拡大率は、従来のピンホールに比べて十分小さく抑えられる。

同様に、上記の条件を満たしていれば、ピンホール径が  $1.5 \mu\text{m}$  でも、ピンホールの散乱に起因する反射波面の拡大率が、従来のピンホールに比べて  $1/2$  程度に抑えられる。

ピンホール径がさらに大きい場合、集光レンズ 1 の残収差を除去するためには、集光レンズの NA を小さくし、集光スポット径をピンホール径に応じて大きくしなければならない。この時、ピンホールを透過する光束の NA は小さくなるため、測定可能な被検面の NA は小さくなる。被検面の NA が小さくなれば、被検面で反射された光束の集光スポット径は大きくなり、結果としてピンホール散乱による反射波面の歪み (= 拡大率) は、ピンホール径が  $1 \mu\text{m}$  の場合と同程度しか発生しない。従って、この場合でも、上記条件式が満足されていれば、反射波面の拡大率を抑制することができる。

図 5 から、 $\gamma$  が大きい方が効果は大きい、 $\gamma = 1$  では集光レンズからの光がピンホールをほとんど透過せず光量不足を招くので、必要な光量を考慮しつつ  $\gamma$  を決定する必要がある。また、図 5 から、ピンホール径が  $0.5 \mu\text{m}$  以下の場合には、かかる反射位相差による反射波面の乱れの影響をほとんど受けない。従って、上記条件は、ピンホール径  $\phi$  が  $0.5 \mu\text{m}$  以上の範囲で適用可能となる。

ピンホール径が  $1 \mu\text{m}$  である場合、上記条件を満たすピンホールミラーとしては、ガラス基板上に、膜厚  $10 \text{ nm}$  のクロムからなる第一反射膜、ピンホールを備えた膜厚  $30 \text{ nm}$  のクロムからなる第二反射膜を順次形成したものが挙げられる。この例では、 $\lambda = 633 \text{ nm}$  の光源を用いた場合、ピンホール内部反射率 (第一反射膜の反射率) は約  $26.5\%$  であり、第一反射膜の透過率は約  $35\%$  である。また、ピンホール外部反射率 (第二反射膜の反射率) は約  $52.5\%$  である。

本発明の PDI によれば、 $0.1 \text{ nm rms}$  程度の高精度で面形状の測定が可能となるため、面精度として  $0.2 \text{ nm rms}$  程度が要求される EUVL

(Extreme Ultra Violet lithography) 用の反射ミラーの超精密計測に用いることができる。

本発明のPDIを用いて、EUVL用の反射ミラーの面精度を測定する場合について以下に説明する。EUVL用反射ミラーは、基板上に重元素層と軽元素層とを交互に積層した多層膜を有している。基板には、ガラス、熔融石英、シリコン単結晶、炭化ケイ素等の基板であって、基板表面が使用波長に比べて十分に滑らかになるように研磨されたものが用いられる。また、重元素層には、例えば、スカンジウム (Sc)、チタン (Ti)、バナジウム (V)、クロム (Cr)、鉄 (Fe)、ニッケル (Ni)、コバルト (Co)、ジルコニウム (Zr)、ニオブ (Nb)、モリブデン (Mo)、テクネチウム (Tc)、ルテニウム (Ru)、ロジウム (Rh)、ハフニウム (Hf)、タンタル (Ta)、タングステン (W)、レニウム (Re)、オスミウム (Os)、イリジウム (Ir)、白金 (Pt)、銅 (Cu)、パラジウム (Pd)、銀 (Ag)、金 (Au) 薄膜等が用いられ、軽元素層には、例えばシリコン (Si)、炭素 (C)、ベリリウム (Be)、窒化珪素 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)、窒化ホウ素 (BN) 薄膜等が用いられる。

反射ミラーの作成には、超高真空中における真空蒸着や、また、化合物材料を用いる場合は、残留酸素等の量が十分少ない真空中におけるスパッタリング法が有効な手段として用いられ、その他、抵抗加熱、CVD、反応性スパッタリング法等、様々の薄膜形成方法を用いることができる。

所定の面精度に達成しない反射ミラーは、再度加工され、多層膜形成後、面精度の測定を行う。所定の面精度を達成するまで、この工程を繰り返して反射ミラーを製造する。

このような製造方法により製造された反射ミラーは、例えば図10に示すEUVLに搭載される。図10は、EUVLの構成を示す概略図である。図10において、レーザー光源100より発したレーザー光 (赤外～可視光) は、集光光学系101により集光位置23に集光される。物体源22より滴下された物体は、集光位置23において高照度のレーザー光を受け、その中心部がプラズマ化し、軟X線が発生し、軟X線の光源 (プラズマX線源) となる。

なお、プラズマX線源に代えてSOR (Synchrotron orbital radiation) を用いてもよい。軟X線としては、50nm以下の波長領域が望ましく、例えば13nmの放射光を用いることができる。また、軟X線は大気に対する透過率が

低いため、装置全体は真空チャンバー 21 により覆われている。

集光位置 23 において発生した軟 X 線は、平面ミラー及び凹面鏡の組み合わせからなる光学系 24、25、26 により所定面積のパターンを有する視野絞り 27 上に導かれる。視野絞り 27 を通過した放射光束は、反射系で構成されるリレー光学系 28 により、マスクステージ ST1 上に載置された反射型マスク 29 上に導かれる。この反射型マスク 29 上には、軟 X 線を反射する反射部と軟 X 線を反射しない非反射部とからなるパターンが形成されている。光学系 24、25、26、28 は、反射マスク 29 上を照明する照明光学系を構成する。

反射型マスク 29 により選択的に反射された放射光束は、投影光学系 30 により基板ステージ ST2 上に載置された被露光基板 31 に導かれ、反射型マスク 29 上のパターンが被露光基板 31 上に投影される。

マスクステージ ST1 及び基板ステージ ST2 はそれぞれ駆動部 MT1 及び MT2 に接続されており、露光に際して、これら駆動部 MT1、MT2 により反射型マスク 29 と被露光基板 31 とは、図 10 中矢印方向に示すように投影光学系 30 に対して相対的に移動し、これによりスキャン露光が行われる。ここで、視野絞り 27 とマスク 29 とはリレー光学系 28 に関して共役な関係にある。また、視野絞り 27 と被露光基板 31 とは、リレー光学系 28、反射型マスク 29 及び投影光学系 30 に関して共役な関係にある。

従って、光学的にはマスク 29 上に視野絞り 27 が配設されているのと等価であるので、照明範囲を制限することができる。かかる構成によれば、マスク 29 近傍に視野絞り 27 が存在しないため、絞り 27 による放射光束の乱れが発生せず、解像力の高い像を得ることができる。また、投影光学系 30 が、その内部に反射マスク 29 の中間像を形成する場合は、その中間像位置に視野絞り 27 を配設してもよい。

視野絞りは 1 つに限られず、走査直交方向（スキャン直交方向）の幅を制限する羽根及び走査方向（スキャン方向）の幅を制限する羽根などの複数の部材から構成されていてもよい。

図 10 に示す EUVL に搭載される反射ミラーは、すべて前述したような製造方法により製造された高精度な面を有する反射ミラーであることが好ましい。も

つとも、このような製造方法により製造された反射ミラーが搭載されるEUVLの構成は、この例に限られないことは言うまでもない。例えば、他のEUVLの例には、米国特許第5,815,310、5,410,434、5,353,332、5,220,590、5,153,898、5,093,586等があげられる。また、本特許出願を基礎として優先権主張を伴った出願をした国の国内法令が許す限りにおいて、上記米国特許の開示を援用して本文の記載の一部とする。

本発明のPDIを、EUVL用ミラー以外の反射ミラーの超精密計測に用いることももちろん可能である。

## 請求の範囲

1. 光源から照射された光を集光光学系を介してピンホールミラーに照射し、このピンホールミラーが備えるピンホールから回折した光の一部を測定用光束として被測定面に照射し、この被測定面で反射された前記測定用光束と、前記ピンホールから回折した光の他の一部である参照用光束とを互いに干渉させ、この干渉により生じる干渉縞の状態を検知することにより前記被測定面の面精度を測定する点回折干渉計であって、

前記ピンホールの直径の範囲が、

$$\lambda / 2 \leq \phi \text{ PH} \leq \lambda / \text{NA}$$

$\lambda$  : 前記光源から照射された光の波長、NA : 前記集光光学系の開口数、 $\phi \text{ PH}$  : 前記ピンホールの直径

である点回折干渉計。

2. 光源から照射された光を集光光学系を介してピンホールミラーに照射し、このピンホールミラーが備えるピンホールから回折した光の一部を測定用光束として被測定面に照射し、この被測定面で反射された前記測定用光束と、前記ピンホールから回折した光の他の一部である参照用光束とを互いに干渉させ、この干渉により生じる干渉縞の状態を検知することにより前記被測定面の面精度を測定する点回折干渉計であって、

前記集光光学系の開口数の範囲が、

$$\text{NA} \leq \lambda / \phi \text{ PH}$$

$$0 < \text{NA} < 1$$

$\lambda$  : 前記光源から照射された光の波長、NA : 前記集光光学系の開口数、 $\phi \text{ PH}$  : 前記ピンホールの直径

である点回折干渉計。

3. 光源から照射された光を集光光学系を介してピンホールミラーに照射し、このピンホールミラーが備えるピンホールから回折した光の一部を測定用光束として被測定面に照射し、この被測定面で反射された前記測定用光束と、前記ピンホールから回折した光の他の一部である参照用光束とを互いに干渉させ、この干



渉により生じる干渉縞の状態を検知することにより前記被測定面の面精度を測定する点回折干渉計であって、

前記ピンホールに照射される光が、楕円偏光であり、

$$0.5 < \varepsilon < 2$$

$\varepsilon$  : 楕円率 (長軸と短軸との比率)

である点回折干渉計。

4. 光源から照射された光を集光光学系を介してピンホールミラーに照射し、このピンホールミラーが備えるピンホールから回折した光の一部を測定用光束として被測定面に照射し、この被測定面で反射された前記測定用光束と、前記ピンホールから回折した光の他の一部である参照用光束とを互いに干渉させ、この干渉により生じる干渉縞の状態を検知することにより前記被測定面の面精度を測定する点回折干渉計であって、

前記ピンホールミラーが、透明基板と、この基板上に順次形成された、第一反射膜と、前記ピンホールを備えた第二反射膜とを有する点回折干渉計。

5. 前記ピンホール径が  $0.5 \mu\text{m}$  以上である場合に、

$$0.5 \leq \gamma < 1$$

$$\phi = \Delta + 360^\circ \times N \quad (-45^\circ \leq \Delta \leq 45^\circ, N: \text{整数})$$

$\gamma$  : 前記ピンホールの内部反射率 (第一反射膜での反射) / 前記ピンホールの外部反射率 (第二反射膜での反射)、 $\phi$  : 前記ピンホールの内部反射と外部反射との位相差

である請求項 4 記載の点回折干渉計。

6. 光源から照射された光を集光光学系を介してピンホールミラーに照射し、このピンホールミラーが備えるピンホールから回折した光の一部を測定用光束として被測定面に照射し、この被測定面で反射された前記測定用光束と、前記ピンホールから回折した光の他の一部である参照用光束とを互いに干渉させ、この干渉により生じる干渉縞の状態を検知することにより前記被測定面の面精度を測定する点回折干渉計であって、

前記ピンホールミラーの前記被測定面側に誘電体多層反射膜が形成されている回折干渉計。

7. 光源から照射された偏光光を偏波保存ファイバーに照射し、このファイバーから射出された偏光光の一部を測定用光束として被測定面に照射し、この被測定面で反射された前記測定用光束と、前記ファイバーから射出された偏光光の他の一部である参照用光束とを互いに干渉させ、この干渉により生じる干渉縞の状態を検知することにより前記被測定面の面精度を測定する点回折干渉計であって、

前記光源と偏波保存ファイバーとの間に回転機構を備えた $\lambda/2$ 板を配置した点回折干渉計。

8. 光源から照射された光をシングルモードファイバーに照射し、このファイバーから射出された光の一部を測定用光束として被測定面に照射し、この被測定面で反射された前記測定用光束と、前記ファイバーから射出された偏光光の他の一部である参照用光束とを互いに干渉させ、この干渉により生じる干渉縞の状態を検知することにより前記被測定面の面精度を測定する点回折干渉計であって、

前記シングルモードファイバーの前記被測定面側の端面に誘電体多層反射膜が形成されている点回折干渉計。

9. 基板上に重元素層と軽元素層とを交互に積層した多層膜が形成された反射ミラーの製造方法であって、

少なくとも、請求項1から請求項8のいずれかに記載された点回折干渉計を用いて面精度を測定する工程を備えていることを特徴とする反射ミラーの製造方法。

10. 軟X線によりマスクを照明する照明光学系と、前記マスクに形成されたパターンを感光基板上に投影露光するための投影光学系とを具備する投影露光装置において、

前記照明光学系又は投影光学系は、請求項9記載の反射ミラーの製造方法により製造された反射ミラーを備えている投影露光装置。

## 要 約 書

本発明は、光源から照射された光を集光光学系を介してピンホールミラーに照射し、ピンホールミラーが備えるピンホールから回折した光の一部を測定用光束として被測定面に照射し、この被測定面で反射された測定用光束と、ピンホールから回折した光の他の一部である参照用光束とを互いに干渉させ、この干渉により生じる干渉縞の状態を検知することにより被測定面の面精度を測定する点回折干渉計に関する。本発明においては、ピンホールの直径の範囲を、 $\lambda/2 \leq \phi_{PH} \leq \lambda/NA$  ( $\lambda$  : 光源から照射された光の波長、 $NA$  : 集光光学系の開口数、 $\phi_{PH}$  : ピンホール径) とする。